第41卷 第12期
2024年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 12
Dec. 2024

乌鲁木齐市和喀什市近地面O_3变化特征及潜在源研究

马正权， 闫劲烨， 帕丽达·牙合甫， 阿力木·阿巴斯

（新疆农业大学资源与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要： 近地面O_3对我国空气质量的影响愈发严重，成为了大气污染治理的首要污染物，新疆虽位于我国西北地区，但近年来O_3问题时有发生，特别是乌鲁木齐市和喀什市。因此，对乌鲁木齐市和喀什市O_3的变化特征及潜在来源进行分析，运用后向轨迹模型探讨乌鲁木齐市和喀什市O_3的传输路径、潜在源区及其影响因素。结果显示：(1) 时间变化上，2015—2022年乌鲁木齐市和喀什市O_3浓度在2018年达到峰值，2018年后小幅度下降，之后变化趋于稳定，O_3浓度季节变化明显，夏季最高，存在“周末效应”和昼夜变化。(2) 后向轨迹分析结果表明，2015—2022年乌鲁木齐市和喀什市的气流轨迹来源相似，长距离气流主要来自西部中亚地区，乌鲁木齐市气流轨迹中长距离输送轨迹占比31.86%，喀什市为15.42%；中短距离气流主要来自本地，乌鲁木齐市气流轨迹中中短距离输送轨迹占比68.14%，喀什市为84.58%。(3) 乌鲁木齐市和喀什市潜在源区覆盖面积大，乌鲁木齐市以本地源为核心潜在源贡献区域，喀什市以外来源和本地源为潜在源贡献区，2022年较2015年相比高值潜在源区范围有一定扩大。

关键词： 乌鲁木齐市；喀什市；近地面O_3；后向轨迹；潜在源区

氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)的排放经光化学反应生成了近地面臭氧[1]，而臭氧作为一种具有高活性和强氧化性的温室气体，过高浓度的O_3不仅会危害人体健康，同时对生态系统及环境健康也会有一定的破坏作用[2-5]。光化学反应及前体物排放为近地面臭氧(O_3)的主要生成因素，同时不同的地理条件以及不同的气象条件也会对其产生较大的影响[6-10]。其前体物的来源不仅包括本地源，也包括外来输送源，有学者研究表明外来输送源对当地臭氧的生成有极大影响[11-16]。

国内外对于臭氧的研究，主要为臭氧来源解析和成因分析以及对于臭氧前体物的研究分析[17-19]；多采用空气质量模型进行数值模拟，并对污染成因及来源进行研究分析[20-21]。常用的来源解析方法有后向轨迹法、源模型和受体模型法，Zeng等[22]使用综合空气质量模型(CAMx)进行模拟计算，发现VOCs受局部排放的影响显著(约70%)，O_3主要归因于区域和超区域迁移，就来源分配而言，运输和工业部门(包括溶剂使用)是O_3和VOCs的主要来源。Zhang等[23]基于WRF-CMAQ模式系统研究北京城郊近地面臭氧，发现垂直扩散是O_3浓度的主要贡献者，在城郊地区，气相化学反应会消耗大量的O_3；夜间去除O_3的NO_x滴定主要发生在城市地区，由于地形原因，非本地排放对O_3水平的贡献在远郊地区明显大于城市和内郊地区。

而国内对于O_3的研究多集中于中东部沿海发达城市的研究，西部内陆城市的相关研究较少。同时，大尺度长时间的研究也仅限于东部及中部部分地区，西部干旱半干旱地区的研究还处于初步探索阶段。新疆作为我国西北内陆最大的省份，是我国向西开放的门户，也是我国丝绸之路经济带的重要地区，具有重要的战略地位。近年来，新疆大气环境问题不断显现，O_3污染问题时有发生[24-25]，同时，有学者研究发现，近年来O_3污染有向西北内陆扩散迁移的趋势[26]。新疆作为农业大省，封闭的地理环境和特殊的气象条件，进一步加大了新疆空气质量

收稿日期： 2024-05-02； **修订日期：** 2024-08-09
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(21966029,21567028)
作者简介： 马正权(1999-)，男，主要从事干旱区资源与环境监测研究. E-mail: 15508200891@163.com
通讯作者： 帕丽达·牙合甫. E-mail: paridayakup@163.com

2004－2014页

改善的阻力[27]。目前,有关新疆O_3的研究多为单一地区某个时段的研究分析,对于结合南北疆城市的O_3研究较少。基于此,本研究以乌鲁木齐市和喀什市近地面O_3为研究对象,选取乌鲁木齐市和喀什市13个气象站点,结合后向轨迹分析方法,探寻乌鲁木齐市和喀什市O_3浓度演变规律,对其气团来源,潜在源区进行分析,为今后新疆大气污染防治提供相关科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市和喀什市位于新疆(图1),乌鲁木齐市作为新疆首府,在全疆有着极为重要的位置,喀什市则为南疆中心,两市均为发展水平较高城市。乌鲁木齐市地处天山中段北麓,三面环山,地势西北低东南高,属温带大陆性干旱半干旱气候,降水主要集中于春季,年降水量在200 mm左右;喀什市地处塔里木盆地西部边缘,紧邻塔克拉玛干沙漠,西北部及南部被山脉或高原包围,地势西南高东北低,属暖温带大陆性干旱气候,年降水量不足150 mm,降水主要集中于夏季,日照强,春夏多大风。两市日温差均较大,以干冷为主[28]。

1.2 数据来源

2015—2022年O_3浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台逐小时监测数据(https://air.cnemc.cn:18007/),研究区内选取监测站点13个(乌鲁木齐:新师大温泉校区、监测站、红光山片区、培训基地、收费所、达坂城区环保局、新疆农科院农场、铁路局、三十一中学、米东区环保局、大绿谷;喀什地区:巡警大队、市环境监测站)。地形图底图为中国科学院地理空间数据云提供的2023年1月Landsat8 OLI卫星拍摄的新疆地区影像图,后向轨迹模型使用的数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)提供的2015—2022年全球资料同化数据(https://www.ncei.noaa.gov)。

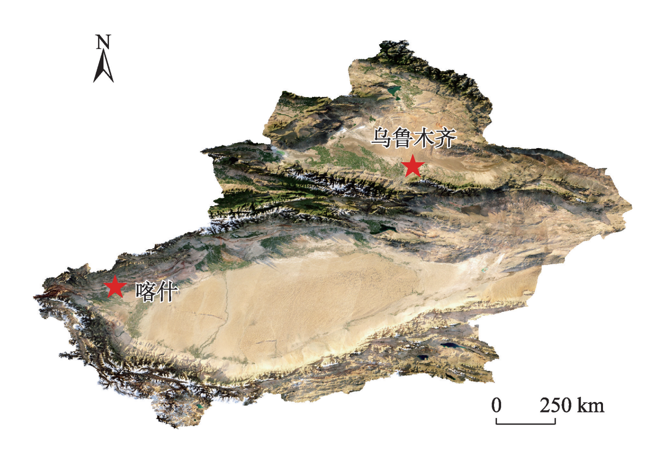


图1 研究区示意图

Fig. 1 Topographic map of Xinjiang

1.3 研究方法

1.3.1 *后向轨迹与聚类分析* HYSPLIT(混合单粒子拉格朗日积分轨道模型)是一种可用于计算大气污染物输送和扩散轨迹过程的综合模式系统[29],由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象局(BoM)联合开发,此模型使用移动的参考系进行对流和扩散计算,能客观合理地描述污染物的大气传输、扩散和沉积模拟[30],目前,已有许多学者将其用于研究大气污染物的输送扩散及潜在源分析[31]。本文利用Meteoinfo软件融合了此模型,对乌鲁木齐市和喀什市进行气流轨迹分析和研究,分别以乌鲁木齐市(43.82°N,87.61°E)和喀什市(39.46°N,75.99°E)为模拟受点,通过欧式距离模拟,气流模拟高度为500 m,模拟时间为72 h,计算出2015—2022年后向轨迹,最后进行轨迹聚类分析。

1.3.2 *污染物潜在贡献源方法和浓度权重轨迹方法* 潜在源贡献因子分析法(PSCF)是基于HYSPLIT模型得出的后向轨迹来确定污染物来源的位置的一种方法。本研究将后向轨迹分布空间按0.5°×0.5°将其进行网格化。PSCF方法是通过计算后向轨迹经过网格(i,j)的污染轨迹数m_{ij}与经过该网格的所有轨迹数n_{ij}的比值,公式如下:

$$\mathrm{PSCF}_{ij}=\frac{m_{ij}}{n_{ij}} \tag{1}$$

其比值越大,则对应的区域对研究点污染物浓度的影响越大[32],因此,PSCF值有一定的不确定性,为了降低不确定性以减小误差,使用权重函数W_{ij}对PSCF进行加权计算,即:WPSCF=PSCF×W_{ij},W_{ij}的具体计算见下式:

$$W_{ij}=\begin{cases}1.00, & 80<n_{ij}\\ 0.72, & 20<n_{ij}\leqslant 80\\ 0.42, & 10<n_{ij}\leqslant 20\\ 0.05, & n_{ij}\leqslant 10\end{cases} \tag{2}$$

式中:n_{ij}为落在网格单元内的平均轨迹端点数,按均

值的4倍、1倍、1/2倍进行划分。

虽然，PSCF法可以给出污染物的潜在源区位置，但无法定量给出潜在源区对受点实际污染物贡献程度的大小，因此，可以通过浓度权重轨迹分析法（CWT）计算经过每个网格轨迹的污染权重指数，反映网格对受点污染物浓度的贡献程度[33]，采用与PSCF法相同的权重函数W_{ij}进行加权计算，即WCWT=CWT×W_{ij}值。

$$\mathrm{WCWT}_{ij}=\mathrm{W}_{ij}\times\frac{1}{\sum_{i=1}^{m}\tau_{ij}}\times\sum_{l=1}^{m}C_l\tau_{ij} \qquad (3)$$

式中：WCWT_{ij}为网格ij污染物的平均权重浓度；C_l为轨迹l过网格ij对应的污染物浓度；τ_{ij}为轨迹l在网格ij的停留时间；m为总气流轨迹数。

2 结果与分析

2.1 近地层大气O_3时间变化特征

图2反映了乌鲁木齐市和喀什市2015—2022年O_3浓度年均值变化规律，喀什市年均值高于乌鲁木齐市，O_3浓度超标天数也多于乌鲁木齐市，特别是2017年，其余年份超标天数较少，这可能是由于喀什市整体气温高于乌鲁木齐市，同时日照时间多于乌鲁木齐市，其光化学反应较强。两市于2018年达到峰值，分别为69.44±3.58 μg·m^{-3}和97.04±2.58 μg·m^{-3}，此后，呈波动下降趋势。2018年前两市经济快速发展，工农业及交通活动强度大，O_3前体物排放逐年增加。2018年国务院颁布《蓝天保卫战三年行动计划》后，两市积极实施了一系列环保政策以及大气污染防治攻坚战行动，使O_3前体物排放逐年减少[34]。

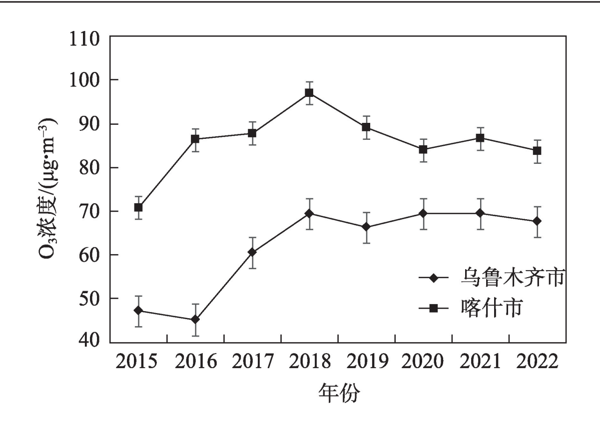


图2 2015—2022年O_3浓度年变化特征

Fig. 2 Annual variation characteristics of O_3 from 2015 to 2022

在季节变化上（图3），乌鲁木齐市和喀什市O_3浓度均呈现出春夏高，秋冬低的季节变化特征，乌鲁木齐市夏季（134 μg·m^{-3}）略低于喀什市夏季（137 μg·m^{-3}），冬季（49 μg·m^{-3}）远低于喀什市（88 μg·m^{-3}）；O_3浓度的季节性差异主要与气象条件和当地多种因素的季节性变化相关[35]，两市晚春和夏季O_3浓度均较高，一方面是因为春季气温回升的同时光照加强，增强了光化学反应，另一方面则是因为该时间段（4—10月）新疆地区工农业活动强度大，其前体物排放强度增强，加之两市周围均被高大山脉包围，封闭的地形阻挡了污染物的扩散，O_3不断积累，此外，夏季大气中的$PM_{2.5}$浓度相较于冬季偏低，$PM_{2.5}$浓度的降低不利于气溶胶对O_3的非均相吸收，大气氧化能力增强，进一步增加了O_3浓度[36]。冬季温度降低且太阳辐射减弱抑制了光化学反应，且此时工农业活动强

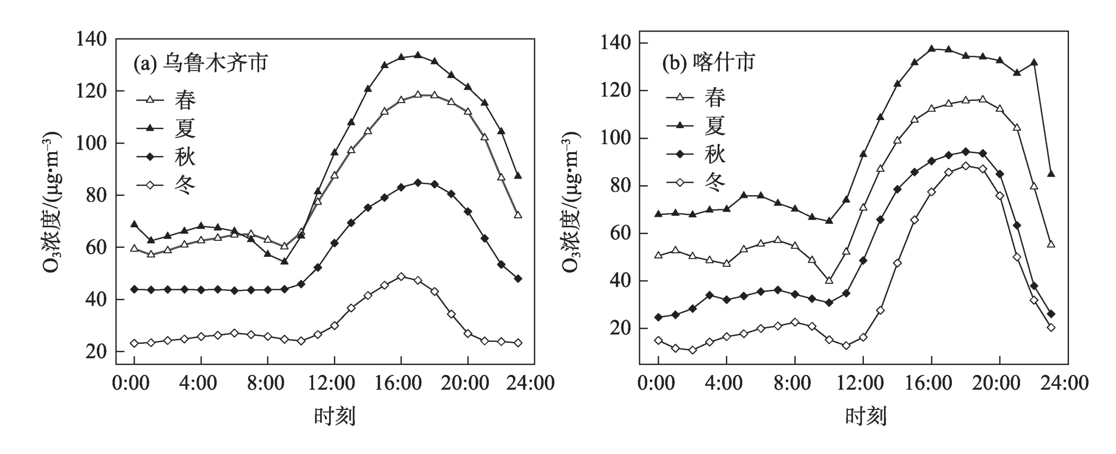


图3 2015—2022年O_3浓度小时变化特征

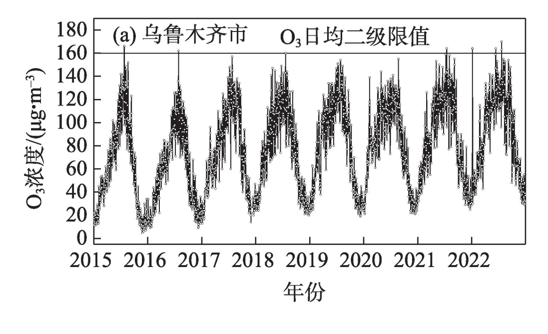
Fig. 3 Hourly variation characteristics of O_3 concentration from 2015 to 2022

度较小，前体物排放强度降低，不利于O_3的形成。日变化上(图4)，乌鲁木齐市和喀什市O_3浓度昼夜变化明显，两市O_3浓度均从9:00左右开始升高，至17:00前后达到峰值，乌鲁木齐市达到峰值后持续下降，峰值持续时间较短，而喀什市峰值持续时间较长，约为4 h(17:00—21:00)，峰值后O_3浓度持续下降至次日9:00左右达到谷值，此变化主要受太阳辐射强度影响，夜间无光照光化学反应停止，加之夜间NO_x的滴定作用和干沉降持续消耗O_3[37]，因此，昼夜差异明显，而喀什市峰值持续时间较长，达4 h，主要是由于喀什市日照时间较长，夏季日落时间至23:00。周变化上(图5)，两市O_3浓度变化趋势均呈不规则"W"型，且存在"周末效应"，O_3周末效应是指城市地区周末的O_3浓度比工作日高的现象[38]，此效应主要是由于工作日和周末交通流量的变化而产生的，周末人为活动减少，NO_x排放降低，使O_3抑制作用较工作日弱，O_3以更快的速率开始积累，造成周末的O_3浓度高于工作日[38]。月变化上(图5)，两市O_3浓度变化趋势均呈倒"V"型，喀什市O_3浓度高于乌鲁木齐市，峰值均出现在7月和谷值均在12月，浓度上升和下降速度迅速。

2.2 后向轨迹与传输路径分析

为进一步研究乌鲁木齐市和喀什市O_3的传输路径及主要传输气团，将其作为模拟受点，基于HYSPLIT模型使用Meteoinfo软件及其中的Trajstat插件对乌鲁木齐市和喀什市2015—2022年的后向气团轨迹进行模拟(图6和图7)。采用欧式距离法进行聚类分析，按轨迹占比大小，将轨迹命名为1~6。

由图6可知，2015—2022年乌鲁木齐市的长距离气流(轨迹4、5)传输逐年下降，长距离气流输送的轨迹占比由2015年的44.11%降至2022年的21.22%，主要来自哈萨克斯坦，个别年份少部分来自俄罗斯。中短距离气流(轨迹1、2、3)传输的轨迹占比由2015年的55.87%升至78.78%，主要来自乌鲁木齐市本地、伊犁哈萨克自治州及塔城地区。结合聚类轨迹的O_3浓度均值分析，2015年、2017年、2020年O_3主要来自哈萨克斯坦的中长距离气流，分别占当年轨迹比重的29.38%、20.90%、18.36%；2022年O_3主要来自塔城地区的短距离气流，占当年轨迹比重的28.27%。



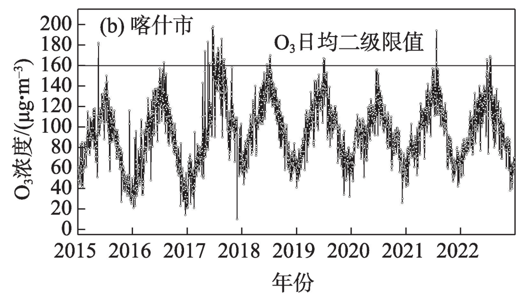
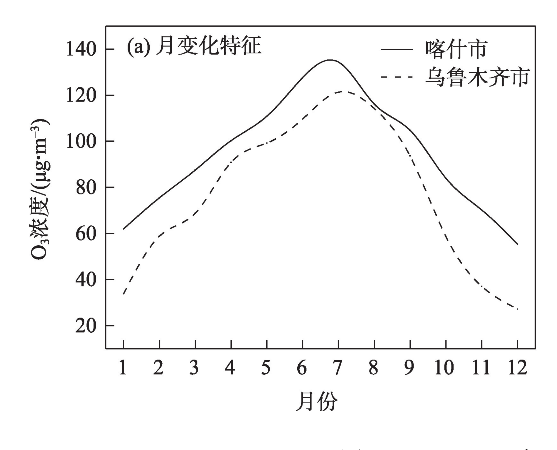


图4　2015—2022年O_3浓度日变化特征

Fig. 4　Daily variation characteristics of O_3 concentration from 2015 to 2022



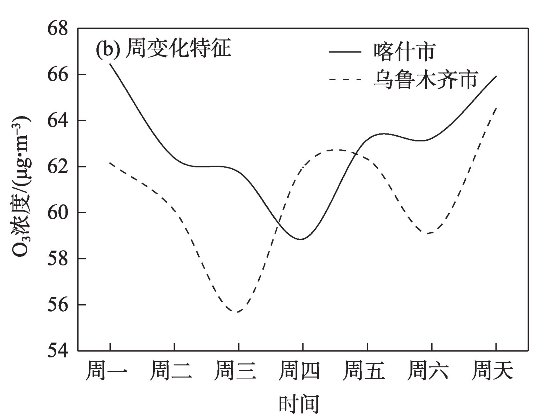


图5　2015—2022年O_3月、周浓度变化特征

Fig. 5　Characteristics of monthly and weekly concentration changes of O_3 from 2015 to 2022

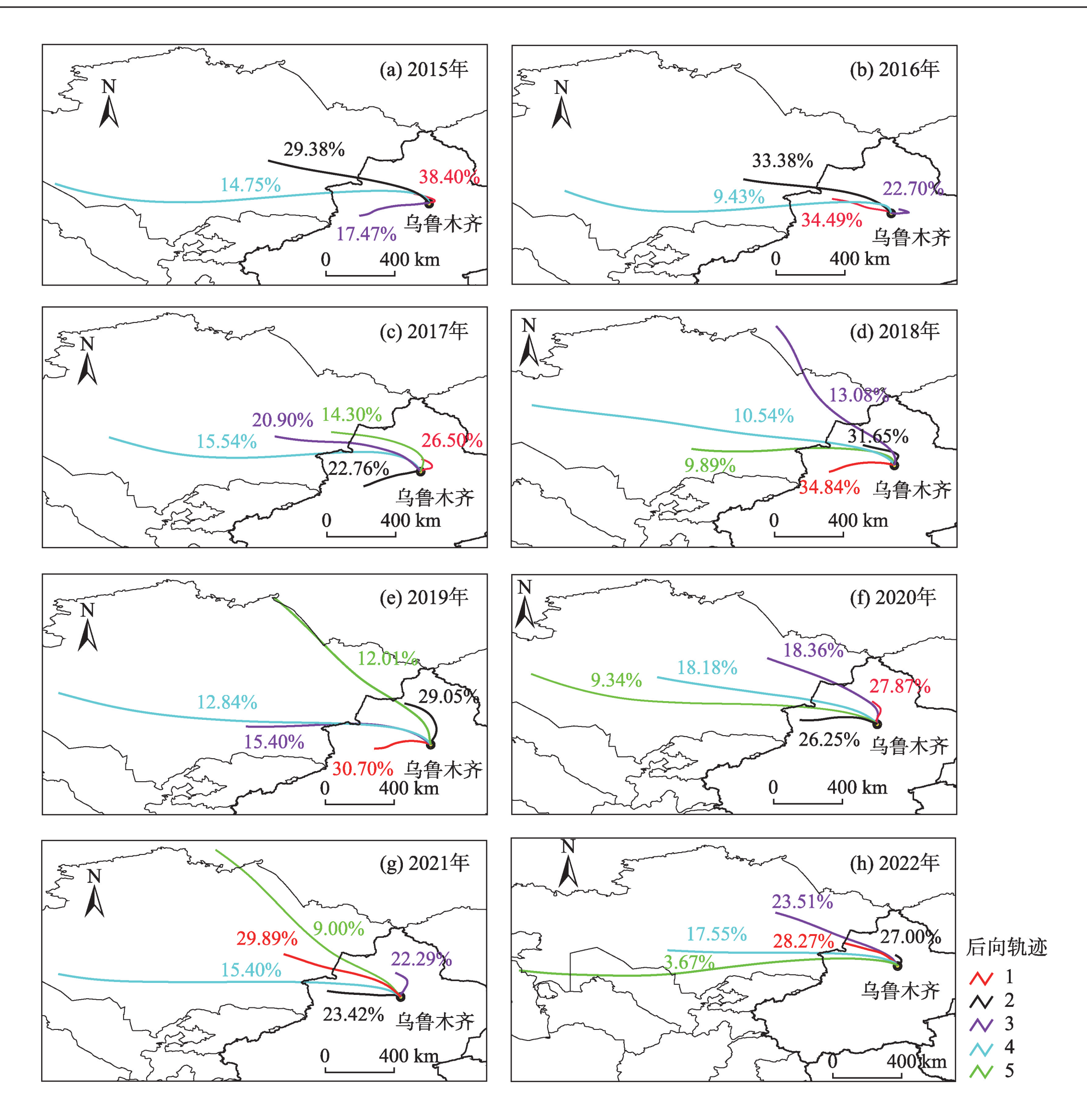


图6 2015—2022年乌鲁木齐市气流轨迹聚类

Fig. 6 Cluster analysis of airflow trajectories in Urumqi from 2015 to 2022

由图7可知，2015—2022年喀什市的长距离气流(轨迹5、6)传输逐年上升，长距离气流输送的轨迹占比由2015年的8.56%升至2022年的36.53%，主要来自中亚地区，个别年份极少部分来自波兰和白俄罗斯。中短距离气流(轨迹1、2、3、4)传输的轨迹占比由2015年的91.34%降至63.47%，主要来自喀什市本地、塔里木盆地北部以及中亚地区。结合聚类轨迹的O_3浓度均值分析，2015年、2017年、2022年O_3主要来自喀什市当地和塔里木盆地北部的短距离气流，分别占当年轨迹比重的43.87%、35.91%、34.35%；2020年O_3主要来自中亚地区的中长距离气流，占当年轨迹比重的20.80%。

综上所述，乌鲁木齐市和喀什市气流轨迹的传输路径和传输来源地较为相似，中长距离气流轨迹传输来自西部，少部分来自西北。中短距离气团几乎全部来自新疆本地，2015—2022年影响乌鲁木齐市和喀什市的气团多来自新疆各盆地内部，由于地形因素影响这些气团大多在盆地内部传输，传输速度较慢，O_3前体物易累积，当携带所经地区的O_3前体物到达乌鲁木齐市和喀什市时，造成O_3浓度升高。

2.3 O_3潜在源区分析

PSCF和CWT模型均可通过计算某区域对受体点的O_3浓度贡献值来判断O_3的潜在源区[38]，其值越大，表示该区域的浓度贡献越高。选取研究时段首尾各2 a，以便观察其潜在源区前后位置及大小变

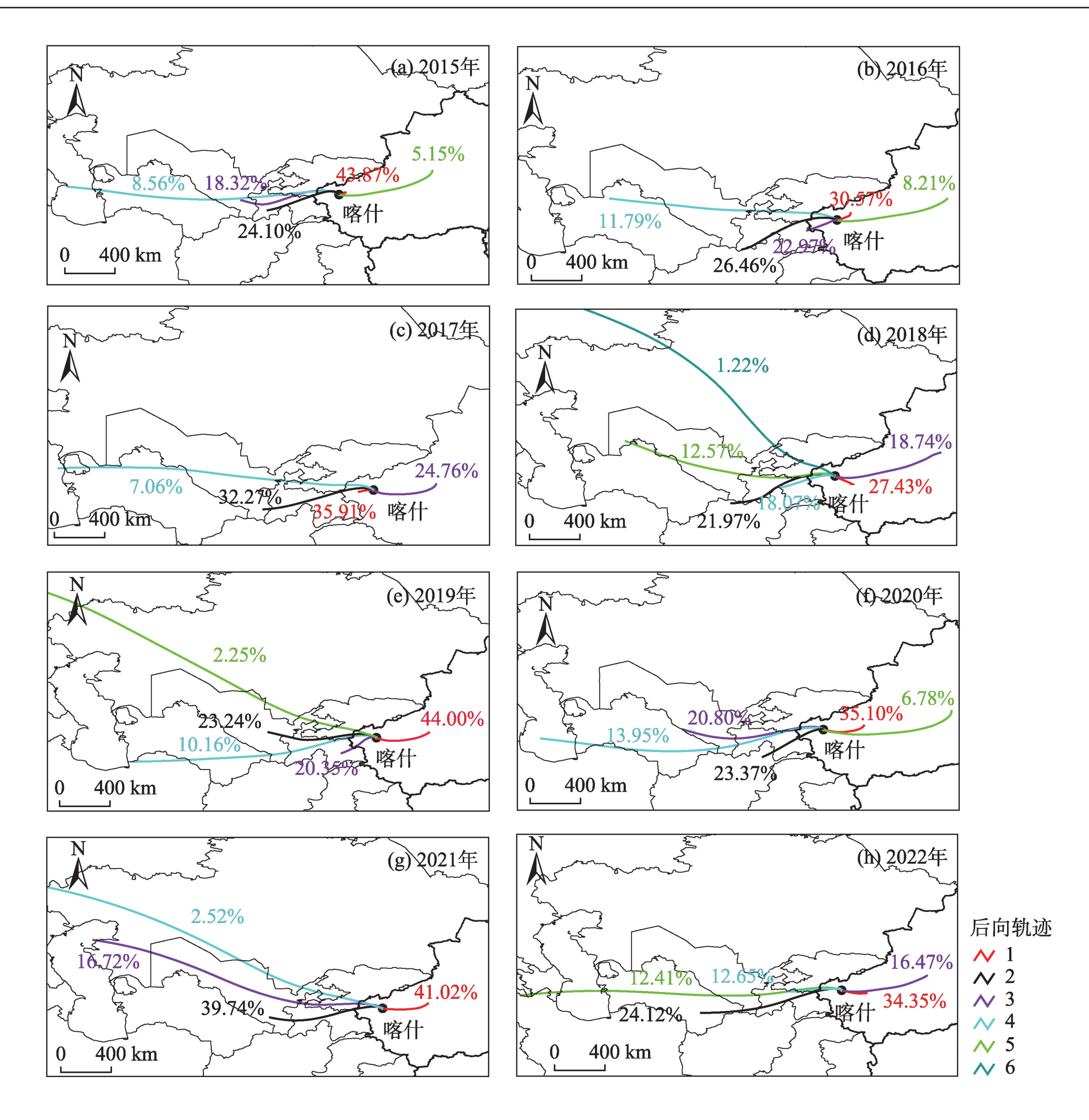


图7　2015—2022年喀什市气流轨迹聚类

Fig. 7　Clustering of air flow trajectories in Kashgar City from 2015 to 2022

化，采用2种模型分别对乌鲁木齐市和喀什市2015年、2017年、2020年、2022年潜在源区进行研究，WPSCF和WCWT结果如图8、图9所示。

乌鲁木齐市2015年、2017年、2020年、2022年O_3潜在源区覆盖面积较大，但年际变化不大，WCWT结果显示，2022年较2015年高值区范围扩大，且潜在源区O_3贡献由46 μg·m^{-3}升至80 μg·m^{-3}。2015年、2017年浓度贡献高值区位于乌鲁木齐市西北部，包括阿勒泰、塔城地区，WPSCF潜在源区贡献率超过0.2；2015年阿勒泰北部、塔城南部对乌鲁木齐市O_3的贡献超过46 μg·m^{-3}，2017年塔城西部、博尔塔拉蒙古自治州对乌鲁木齐市O_3的贡献超过58 μg·m^{-3}。2020年、2022年浓度贡献高值区位于乌鲁木齐市东部和西北部，除阿勒泰、塔城地区外，还包括昌吉回族自治州、吐鲁番市，与王笠成等[40]的研究结果一致，2020年WPSCF潜在源区贡献率超过0.4，2022年超过0.58；2020年吐鲁番北部、昌吉西部和东部、塔城地区对乌鲁木齐市O_3的贡献超过59 μg·m^{-3}，2022年贡献超过70 μg·m^{-3}。

喀什市2015年、2017年、2020年、2022年O_3潜在源区覆盖面积大，呈东西分布，基本无年际变化，WCWT结果显示，2022年较2015年高值区范围有一定扩大，潜在源区O_3浓度贡献无变化。2015年、2017年浓度贡献高值区主要位于喀什市西北部，为吉尔吉斯斯坦西部地区，WPSCF潜在源区贡献率超过0.58；2015年吉尔吉斯斯坦西部地区对喀什市O_3的贡献超过82 μg·m^{-3}，2017年贡献超过100 μg·m^{-3}。2020年、2022年浓度贡献高值区位于喀什市东部和

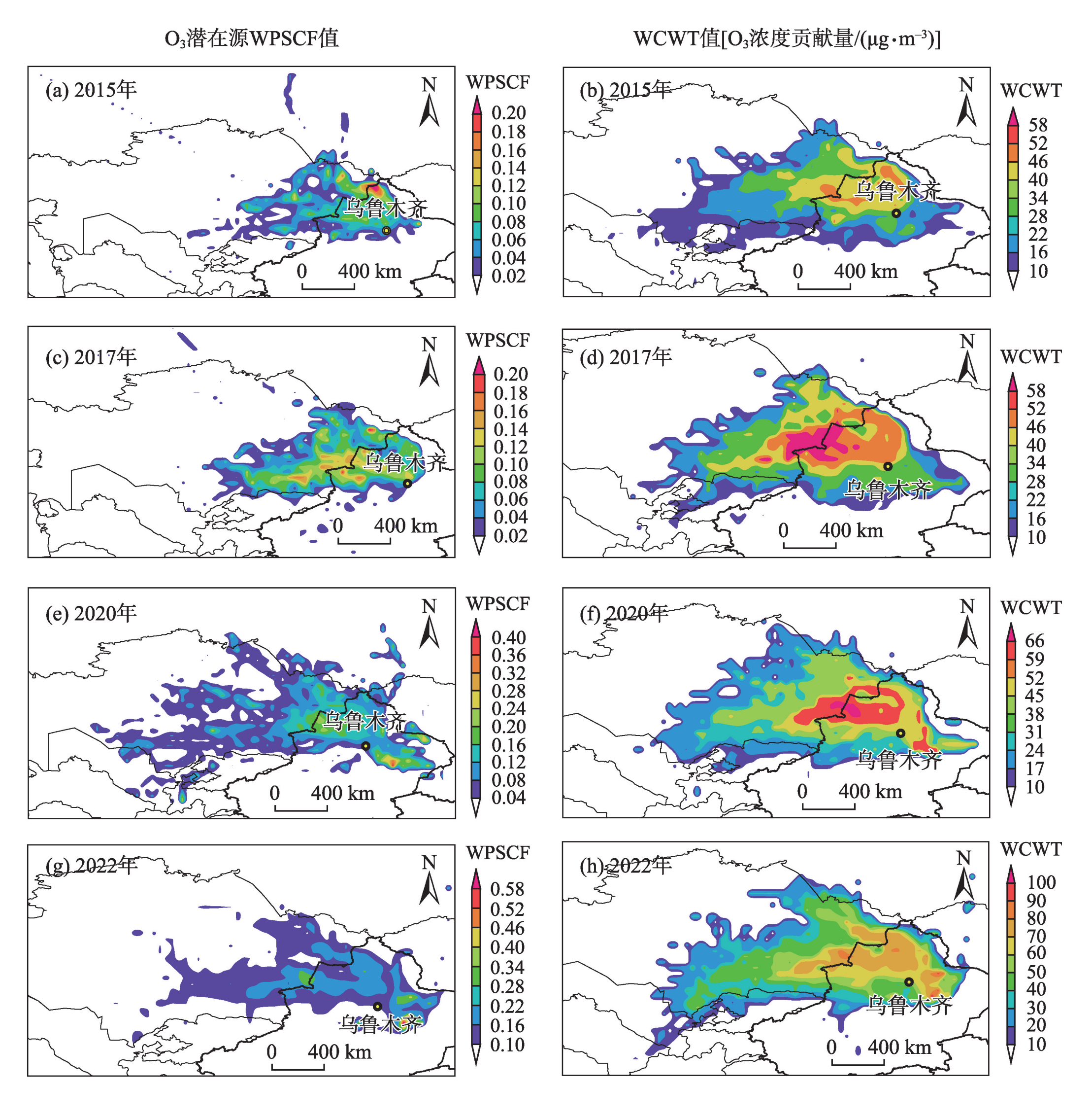


图8 2015年、2017年、2020年、2022年乌鲁木齐市O_3潜在源区分析

Fig. 8 Analysis of potential source areas of O_3 in Urumqi in 2015, 2017, 2020 and 2022

西北部，包括阿克苏、和田地区以及吉尔吉斯斯坦，2020年WPSCF潜在源区贡献率超过0.44，2022年超过0.58；2020年和田北部和吉尔吉斯斯坦中部对喀什市O_3的贡献超过73 $\mu g \cdot m^{-3}$，2022年阿克苏中部、和田南部以及吉尔吉斯斯坦东部对喀什市贡献超过82 $\mu g \cdot m^{-3}$。

综上所述，2015年、2017年、2020年、2022年乌鲁木齐市和喀什市O_3潜在源区覆盖面积大，潜在源区覆盖面积基本无年际变化，但高值区范围均有一定程度的扩大，乌鲁木齐市以本地源为核心潜在源区，喀什市则以本地源与外来源为主要潜在源，且2种源程度相当。两市均有本地源，一是乌鲁木齐市和喀什市同处盆地边缘以及独特的气象条件；二是由于乌鲁木齐市和喀什市同为经济发展较好的地区，人口密度大、各类工业活动强、前体物排放强度大，使本地源成为核心潜在源区，与李婷苑等[41]的研究结果相似。喀什市由于靠近边境，且为繁华的通商口岸，因此，其外来源占比也较高。乌鲁木齐市高值潜在源区主要在阿勒泰、塔城地区，2022年较2015年高值潜在源区贡献率和潜在源区贡献值均有升高；喀什市高值潜在源区主要在阿克苏、和田地区以及吉尔吉斯斯坦，2022年较2015年高值潜在源区贡献率和潜在源区贡献值无变化。

3 结 论

通过对乌鲁木齐市和喀什市O_3的变化特征及潜在来源进行分析，运用后向轨迹模型探讨乌鲁木齐市和喀什市O_3的传输路径、潜在源区，得出以下主要结论：

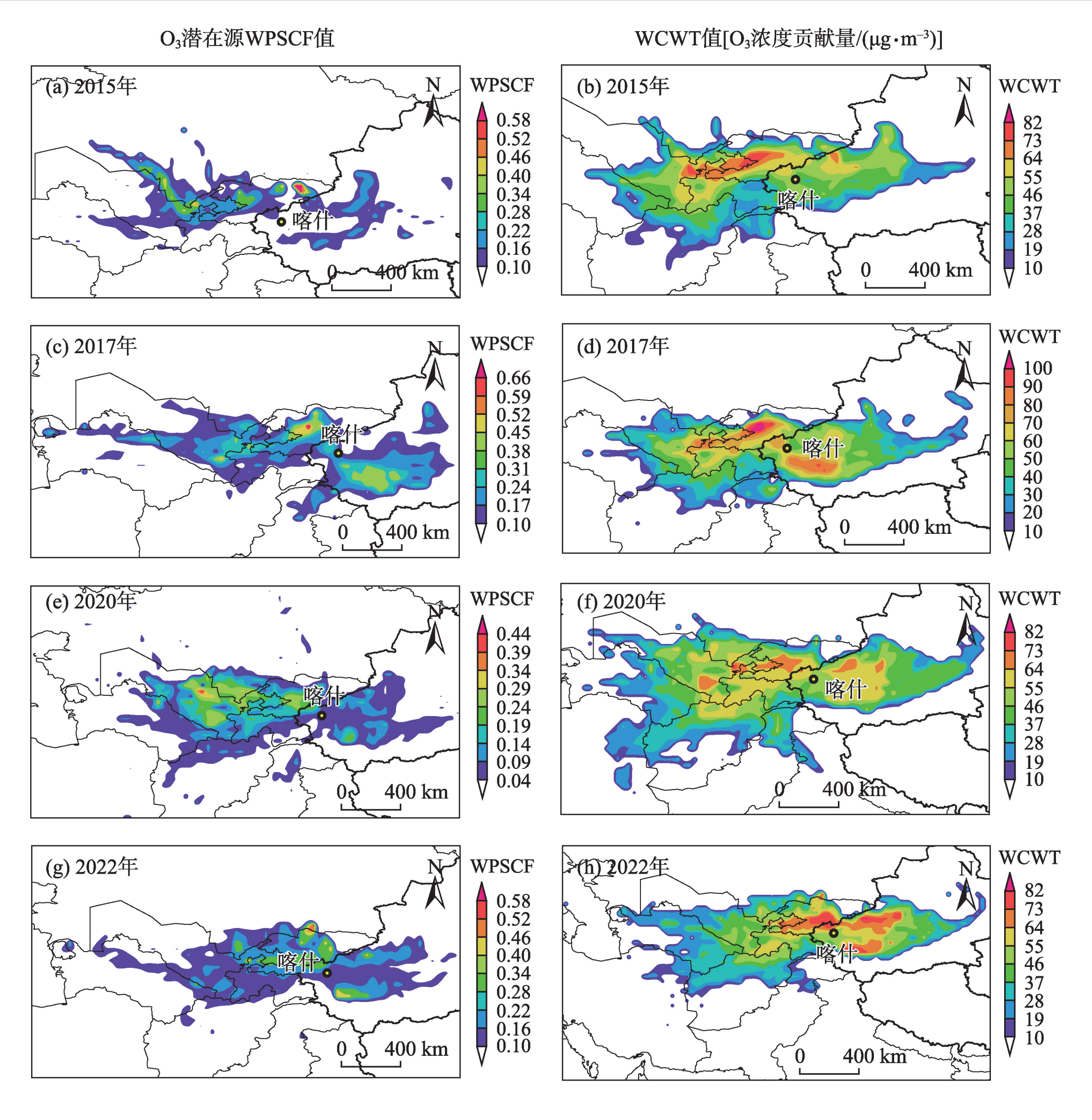


图9 2015年、2017年、2020年、2022年喀什市O_3潜在源区分析

Fig. 9 Analysis of potential source areas of O_3 in Kashgar in 2015, 2017, 2020 and 2022

(1) 乌鲁木齐市和喀什市2015—2022年O_3浓度年均值变化规律显示两市于2018年达到峰值,分别为69.44±3.58 μg·m^{-3}和97.04±2.58 μg·m^{-3},此后,呈逐年下降趋势。乌鲁木齐市和喀什市O_3浓度季节变化明显,夏季最高,喀什市高于乌鲁木齐市;日变化上,昼夜差异大,17:00左右达到峰值;周变化趋势上呈不规则"W"型,且存在"周末效应"。

(2) 通过对乌鲁木齐市和喀什市进行后向轨迹和潜在源区分析表明,2015—2020年乌鲁木齐市和喀什市的气流轨迹来源相似,长距离气流主要来自西部中亚地区,乌鲁木齐市气流轨迹中长距离输送轨迹占比31.86%,喀什市气流轨迹中长距离输送轨迹占比15.42%;中短距离气流主要来自本地,乌鲁木齐市气流轨迹中短距离输送轨迹占比68.14%,喀什市气流轨迹中中短距离输送轨迹占比84.58%。乌鲁木齐市和喀什市潜在源区覆盖面积大,乌鲁木齐市以本地源为核心潜在源贡献区域,而喀什市既有本地源也有外来源,2022年较2015年相比喀什市本地输送源占比有一定提升。

参考文献(References):

[1] Li K W, Chen L H, Ying F, et al. Meteorological and chemical impacts on ozone formation: A case study in Hangzhou, China[J]. Atmospheric Research, 2017, 196: 40-52.

[2] 崔梦瑞, 白林燕, 冯建中, 等. 京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(2): 373-385. [Cui Mengrui, Bai Lingyan, Feng Jianzhong, et al. Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region[J].

Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(2): 373-385.]

[3] 高冉, 李琴, 车飞, 等. 京津冀地区2015—2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2525-2536. [Gao Ran, Li Qin, Che Fei, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of ozone concentration and health benefit assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020 [J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2525-2536.]

[4] 赵楠, 卢毅敏. 中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1235-1245. [Zhao Nan, Lu Yimin. Estimation of surface ozone concentration and health impact assessment in China[J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1235-1245.]

[5] 曾贤刚, 阮芳芳, 姜艺婧. 中国臭氧污染的空间分布和健康效应[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 4025-4032. [Zeng Xiangang, Ruan Fangfang, Jiang Yijing. Spatial distribution and health effects of ozone pollution in China[J]. China Environmental Science, 2019, 39(9): 4025-4032.]

[6] 王凤娟. 大气$PM_{2.5}$和臭氧复合污染特征及气象成因研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(10): 150-155. [Wang Fengjuan. Analysis on characteristics and meteorological causes for combined pollution of atmospheric $PM_{2.5}$ and ozone[J]. Environmental Science and Management, 2023, 48(10): 150-155.]

[7] 冯浩鹏, 康平, 张文倩, 等. 四川盆地夏季区域性持续性臭氧过程垂直变化差异及气象成因[J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 14-26. [Feng Haopeng, Kang Ping, Zhang Wenqian, et al. Vertical variation and meteorological causes of regional persistent ozone processes over Sichuan Basin during summer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(4): 14-26.]

[8] 林鑫, 仝纪龙, 王伊凡, 等. 基于CMAQ和HYSPLIT模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3098-3107. [Lin Xin, Tong Jilong, Wang Yifan, et al. Analysis of causes and sources of summer ozone pollution in Rizhao based on CMAQ and HYSPLIT models[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3098-3107.]

[9] 赵旭辉, 张付海, 王含月, 等. 合肥市典型臭氧污染特征及成因分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(4): 90-103. [Zhao Xuhui, Zhang Fuhai, Wang Hanyue, et al. Typical characteristics and causes of the ozone pollution process in Hefei[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(4): 90-103.]

[10] 胡亚男, 王佳, 徐丽娜, 等. 内蒙古近地面臭氧污染时空分布特征及气象条件分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(5): 65-72. [Hu Yanan, Wang Jia, Xu Lina, et al. Analysis of meteorological conditions and temporal and spatial distribution characteristics of ground-level ozone pollution in Inner Mongolia[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(5): 65-72.]

[11] 肖凯, 任学昌, 陈仁华. 嘉峪关市大气污染物传输特征与潜在源分析[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 92-101. [Xiao Kai, Ren Xuechang, Chen Renhua. Analysis of transmission characteristics and potential sources of air pollutants in Jiayuguan[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 92-101.]

[12] 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 等. 2015—2021年京津冀及周边地区$PM_{2.5}$和臭氧复合污染时空特征分析[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 1841-1851. [Song Xiaohan, Yan Li, Liu Wei, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of co-pollution of $PM_{2.5}$ and ozone over BTH with surrounding area from 2015 to 2021[J]. Environmental Science, 2023, 44(4): 1841-1851.]

[13] 郭云飞, 包云轩, 沈利洪, 等. 苏州市近地面臭氧时空分布特征及模拟分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 66-77. [Guo Yunfei, Bao Yunxuan, Shen Lihong, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and simulation analysis of subaerial ozone in Suzhou City[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(7): 66-77.]

[14] 肖建军, 汪太明, 王业耀, 等. 中国自然背景地区臭氧浓度时空变化特征分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(9): 2128-2135. [Xioa Jianjun, Wang Taimin, Wang Yeyao, et al. Analysis of ozone time series variation in atmospheric background area in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(9): 2128-2135.]

[15] 周炎, 张涛, 林玉君, 等. 珠三角城市群甲醛的时空分布、来源及其对臭氧生成的影响[J]. 环境化学, 2022, 41(7): 2356-2363. [Zhou Yan, Zhang Tao, Lin Yujun, et al. The characteristics and source of formaldehyde in the Pearl River Delta and its impact on ozone formation[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(7): 2356-2363.]

[16] 柯碧钦, 何超, 杨璐, 等. 华北地区地表臭氧时空分布特征及驱动因子[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1562-1574. [Ke Biqin, He Chao, Yang Lu, et al. The spatiotemporal variation of surface ozone and the main driving factors in North China[J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1562-1574.]

[17] 于玉洁, 杨臣强, 杨瑞, 等. 石家庄市城区春季VOCs污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, 45(8): 4459-4469. [Yu Yujie, Yang Chenqiang, Yang Rui, et al. Pollution characteristics and source apportionment of VOCs in urban areas of Shijiazhuang in spring[J]. Environmental Science, 2023, 45(8): 4459-4469.]

[18] 汪庆, 骆慧晓, 孟文芳, 等. 邯郸市$PM_{2.5}$和O_3污染特征及潜在源分析[J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 53-69. [Wang Qing, Luo Huixiao, Meng Wenfang, et al. Analysis of characteristics and potential sources of $PM_{2.5}$ and O_3 pollution in Handan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(4): 53-69.]

[19] Wang Y F, Tong J L, Chen Y X, et al. Analysis of O_3 Sources in Yulin City in summer based on WRF-CMAQ/ISAM Model[J]. Huan Jing Ke Xue, 2023, 44(7): 3676-3684.

[20] Qi H Y, Duan W J, Cheng S Y, et al. O_3 transport characteristics in eastern China in 2017 and 2021 based on complex networks and WRF-CMAQ-ISAM[J]. Chemosphere, 2023, 337: 139258.

[21] Wang Y J, Jiang S, Huang L, et al. Differences between VOCs and NO_x transport contributions, their impacts on O_3, and implications for O_3 pollution mitigation based on CMAQ simulation over the Yangtze River Delta, China[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 872: 162118.

[22] Zeng X X, Han M J, Ren G, et al. A comprehensive investigation on source apportionment and multi-directional regional transport of volatile organic compounds and ozone in urban Zhengzhou[J]. Chemosphere, 2023, 334: 139001.

[23] Zhang S X, Zhang Z Z, Li Y, et al. Formation processes and source contributions of ground level ozone in urban and suburban Beijing using the WRF CMAQ modelling system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 127: 753-766.

[24] 王蕾, 孜比布拉·司马义, 杨胜天, 等. 北疆主要城市的大气污染状况分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(6): 182-186. [Wang Lei, Zibibula Simayi, Yang Shengtian, et al. Analysis on the air pollution status of major cities in northern Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(6): 182-186.]

[25] 巩庆, 范金霞, 林卫, 等. 2014—2015年新疆库尔勒市空气质量的时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 77-82. [Gong Qing, Fan Jinxia, Lin Wei, et al. Spatial and temporal distribution of air quality levels and primary pollutant in Korla City, Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 77-82.]

[26] Simayi M, Shi Y Q, Xi Z Y, et al. Emission trends of industrial VOCs in China since the clean air action and future reduction perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2022, 826: 153-994.

[27] 谢运兴, 唐晓, 郭宇宏, 等. 新疆大气颗粒物的时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2019, 35(1): 26-36. [Xie Yunxing, Tang Xiao, Guo Yuhong, et al. Spatial and temporal distribution of atmospheric particulate matter in Xinjiang[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(1): 26-36.]

[28] 汤三玲. 近40年新疆气温和降水的时空变化特征[D]. 成都: 四川师范大学, 2021. [Tang Sanling. Spatiotemporal Variations of the Temperature and Precipitation in Xinjiang during the Past 40 Years[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021.]

[29] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 562-569. [Liu Zilong, Dai Bin, Cui Zhuoyan, et al. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: A case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 562-569.]

[30] Chen Z, Chen D, Zhao C, et al. Influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations across China: A review of methodology and mechanism[J]. Environment International, 2020, 139(C): 105558.

[31] Lei Y, Zhang X L, Kang P, et al. Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan province[J]. Environmental Science, 2020, 417: 3021-3030.

[32] Hao T, Cai Z, Chen S, et al. Transport pathways and potential source regions of $PM_{2.5}$ on the west coast of Bohai Bay during 2009~2018[J]. Atmosphere, 2019, 10(6): 345-355.

[33] 王帅, 林宏, 王佳楠, 等. 沈阳地区冬季空气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 80-86. [Wang Shuai, Lin Hong, Wang Jianan, et al. Analysis of the transport path and potential source of air particles in Shenyang during the winter [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(1): 80-86.]

[34] 刘旻霞, 孙瑞弟, 宋佳颖, 等. 基于OMI数据的新疆地区臭氧柱浓度研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1498-1510. [Liu Minxia, Sun Ruidi, Song Jiaying, et al. Research on ozone column concentration in Xinjiang based on OMI data[J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1498-1510.]

[35] Wang Z Y, Duan X J , Liang T, et al. Analysis of spatiotemporal distribution characteristics and socioeconomic drivers of urban air quality in China[J]. Chemosphere, 2022, 291: 132799.

[36] Li K, Daniel J, Liao H, et al. Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China[J]. Environmental Sciences, 2019, 116(2): 422- 427.

[37] Wang W J , Parrish D D, Li X, et al. Exploring the drivers of the increased ozone production in Beijing in summertime during 2005-2016[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(24): 15617-15633.

[38] Atkinson-Palombo M C, Miller A J, Balling C R. Quantifying the ozone "weekend effect" at various locations in Phoenix, Arizona [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(39): 7644-7658.

[39] Fujita E M, Stockwell W R, Campbell D E, et al. Evolution of the magnitude and spatial extent of the weekend ozone effect in California's South Coast Air Basin, 1981-2000[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(7): 802-815.

[40] 王笠成, 邵波霖, 彭彤茵, 等. 基于PSCF与CWT模型对乌鲁木齐市地表臭氧源区分析[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(10): 129-137. [Wang Licheng, Shao Bolin, Peng Tongyin, et al. Analysis of land-surface ozone source-areas in Urumqi City based on PSCF and CWT models[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(10): 129-137.]

[41] 李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 等. 2022年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3695-3704. [Li Tingyuan, Chen Jingyang, Gong Yu, et al. Meteorological formation mechanisms and potential sources of an ozone pollution process in winter of 2022 in Guangdong Province[J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 3695-3704.]

Characteristics and potential sources of surface O_3 variation in Urumqi and Kashgar

MA Zhengquan, YAN Jingye, Palida YAHEFU, Alim ABBAS
(College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: The impact of surface O_3 on air quality in China has intensified, making it the primary pollutant for air quality management. As a gateway to Northwest China, Xinjiang has undergone rapid economic development, resulting in air quality issues, particularly in Urumqi and Kashgar. In this study, we analyzed the variation characteristics and potential sources of O_3 in these cities and employed a backward trajectory model to explore transmission paths, potential source areas, and influencing factors. The results indicated the following: (1) From 2015 to 2022, O_3 concentrations in Urumqi and Kashgar peaked in 2018, followed by a slight decrease and subsequent stabilization. O_3 concentrations showed significant seasonal variations, with the highest concentrations occurring in summer, alongside weekend effects and diurnal fluctuations. (2) Backward trajectory analysis revealed that from 2015 to 2022, airflow sources in Urumqi and Kashgar were similar, with long-distance airflows primarily originating from the western Central Asian region. Long-distance transport trajectories account for 31.86% of airflow trajectories in Urumqi, compared to 15.42% in Kashgar. Conversely, medium- and short-distance airflows mainly come from local sources, constituting 68.14% of the trajectories in Urumqi and 84.58% in Kashgar. (3) Urumqi and Kashgar encompass extensive potential source areas. In Urumqi, local sources are the primary contributors, while potential sources in Kashgar include both local and external origins. The range of high-value potential source areas expanded in 2022 compared to 2015.

Keywords: Urumqi; Kashgar; near ground O_3; backward trajectory; potential source area